

Zastosowanie modeli regresji segmentowej w identyfikacji początku reakcji przyrostowej na przykładzie drzewostanu zachowawczego sosny zwyczajnej w Nadleśnictwie Krzystkowie

Szymon Jastrzębowski, Marcin Klisz

Abstrakt. Drzewostany zachowawcze są jedną z form ochrony *in situ* zasobów genowych lasów Polski. Podstawowym kryterium przyjmowanym przy wyborze drzewostanów proponowanych do uznania za zachowawcze jest ich rodzimność. W przypadku drzewostanów sosnowych i świerkowych przyjmuje się, że za rodzime można uznawać drzewa i drzewostany starsze niż 150 lat. W trakcie kwalifikowania starodrzewi sosnowych w Nadleśnictwie Krzystkowie jako drzewostanów zachowawczych przeprowadzono ocenę wieku rzeczywistego drzew z wykorzystaniem metod dendrochronologicznych. Analiza profili słoii rocznych uzyskanych z wywierców pobranych z 50 drzew próbnych, dostarczyła informacji o reakcji przyrostowej związanej z prześwietleniem drzewostanu. Zaproponowano metodę identyfikacji wieku początku reakcji przyrostowej z wykorzystaniem modelu regresji segmentowej. Porównanie wartości udziału wariancji wyjaśnionej i współczynnika determinacji R^2 , pozwoliło zidentyfikować rok rozpoczęcia reakcji przyrostowej u 37 drzew. U 11 drzew był to rok 1941, natomiast u 12 drzew rok 1942. Dla części drzew koniecznym okazało się zastosowanie rozbudowanego modelu regresji segmentowej opartego na więcej niż dwóch krzywych regresji.

Słowa kluczowe: *Pinus sylvestris*, wiek rzeczywisty, przyrost drzew, regresja segmentowa

Abstract. The forest gene conservation stands (FGCs) are one of the form of protective forest gene resources (*in situ*) in Poland. The basic criterion is adopted in the selection of FGCs is their native character. In case of pine and spruce tree stands is assumed, that native character have trees and tree stands older than 150 years. It means that these tree stands were created before uncontrolled trade in seeds in the mid-nineteenth century.

This paper presents the method of identifying the beginning of a radial growth reaction using piecewise regression model (non-linear regression model). Analysis of profile of annual growth rings was performed on 50 sample trees in Krzystkowie Forest District (51°49'13"N, 15°12'02"E). Compared values of explained variance and determination coefficient made it possible to identify beginning of growth reaction in 37 trees. Piecewise regression model is useful for determining the precise age of the beginning of growth reaction.

Key words: *Pinus sylvestris*, actual age, radial growth, piecewise regression

Wstęp

Polska jest jednym z nielicznych krajów europejskich, który posiada bazę nasienną o bardzo dużym zróżnicowaniu genetycznym. W wyniku doboru naturalnego oraz działania czynników ze-

wewnętrznych, populacje drzew dostosowywały się do aktualnych warunków środowiska (Ledig 1986). Intensywne użytkowanie lasu (na niektórych obszarach wręcz rabunkowe), prognozowane zmiany klimatu, selekcja kierunkowa oraz zastępowanie rodzimych gatunków introdukowanymi, stanowią realne zagrożenie dla trwałości ekosystemów leśnych (Hosius et al. 2006). Przyjęty w Polsce podział na selekcję indywidualną i populacyjną umożliwia wybór najlepszych populacji (gospodarze drzewostany nasienne, wyłączone drzewostany nasienne) i osobników (drzewa macieczne). Pewną wątpliwość może jednak budzić rodzimość tych obiektów w świetle sposobów odnawiania lasu z przełomu XIX i XX wieku.

W przypadku drzewostanów sosnowych, świerkowych i modrzewiowych za rodzime uważać można drzewa i drzewostany w wieku co najmniej 150-200 lat tj. powstałe przed okresem wzmoczonego, niekontrolowanego handlu nasionami i intensyfikacją gospodarki leśnej w II połowie XIX wieku (Korczyk 1987; Litkowiec et al. 2009). W celu ochrony zasobów genowych osobników i populacji głównych gatunków lasotwórczych, uznanych za prawdopodobnie rodzime, w 1994 roku rozpoczęto wybór obiektów zachowawczych. Obecne kryteria ich uznawania, do czasu uzyskania charakterystyki genetycznej wszystkich populacji w granicach występowania gatunku, oparte są na informacji o wieku oraz wartości fenotypowej. Prawdopodobnie, podobnie jak w przypadku wyboru obiektów nasiennych, taki sposób wyboru obarczony jest błędem, wynikającym z subiektywnej oceny cech hodowlanych, szczególnie jakościowych, ulegających wpływowi środowiska (Nowakowska, Rakowski 2005). Najczęściej brakuje informacji o sposobie powstania danego drzewostanu. Samo ustalenie wieku nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie czy dany obiekt powstał w drodze odnowienia naturalnego i czy jest przedłużeniem autochtonicznej populacji. Pojawienie się warunków do powstania nowego pokolenia drzew znajduje swoje odzwierciedlenie w reakcji przyrostowej. Najczęściej warunki takie powstają w wyniku naturalnych katastrof, takich jak gradacje owadów, pożary, huragany i inne zjawiska biotyczne i abiotyczne. Mogą one wystąpić także jako efekt działalności człowieka. Identyfikacja początku reakcji przyrostowej pozwala na odtworzenie historii badanej populacji i wnioskowanie na temat sposobu jej powstania. W zestawieniu z danymi historycznymi dotyczącymi sposobu prowadzenia gospodarki leśnej w danym regionie, uzyskuje się tym samym precyzyjną informację pozwalającą na poprawny wybór obiektów zachowawczych.

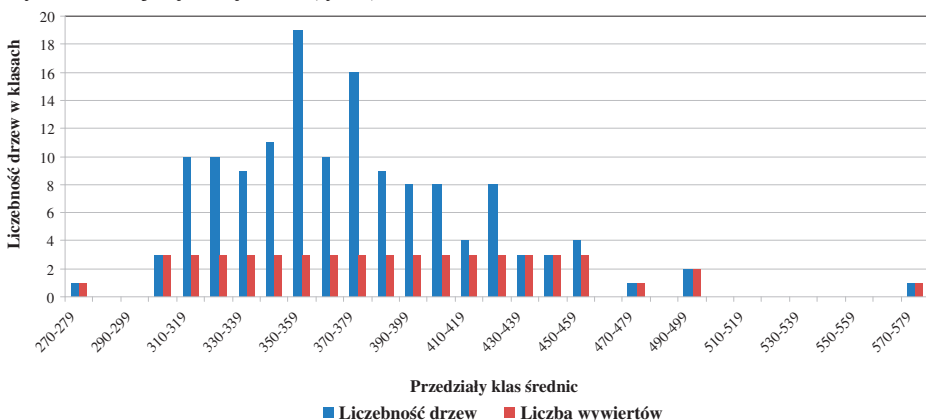
W Lasach Państwowych najwięcej obiektów zarejestrowanych jest w szczecińskiej regionalnej dyrekcji Lasów Państwowych (37), natomiast najmniejszą liczbę drzewostanów zachowawczych posiada RDLP w Łodzi i Poznaniu (3). W ogólnej liczbie 218 drzewostanów zachowawczych, 64% stanowią drzewostany sosnowe (138). Związane jest to z ogólną strukturą gatunkową drzewostanów w LP. Ponadto nasiona sosny, obok nasion świerka i modrzewia, były w przeszłości przemieszczane na duże odległości bez uwzględniania zasad przenoszenia nasion. Wszystkie obiekty zachowawcze zajmują ogółem powierzchnię 3205,14 ha, z czego na drzewostany sosnowe przypada 1614,35 ha.

Material i metody

W celu kwalifikacji starodrzewia sosny zwyczajnej jako drzewostanu zachowawczego, przeprowadzono ocenę wieku w oparciu o wywierty pobrane z drzew próbnych. Obiektem badawczym było wydzielone drzewostanowe w oddziale 27 zlokalizowane w Nadleśnictwie Krzystkowiec należącym do RDLP Zielona Góra. Zgromadzone w Nadleśnictwa Krzystkowiec archiwalne dokumenty potwierdziły ciągłość prowadzenia gospodarki leśnej na badanym obszarze od 1845 roku. Efektem dynamicznego rozwoju przemysłu zbrojeniowego III Rzeszy w przełomie lat 30. i 40. XX wieku, było zlokalizowanie na terenie Lasów Krzystkowieckich fabryki materiałów wybuchowych Alfred Nobel Dynamit Aktien-Gesellschaft. Kilkadziesiąt obiektów o charakterze militarnym rozmieszczono pod okapem drzewostanu, który miały pełnić funkcję maskującą. W oddziale 27 wybudowano pięć betonowych silosów na płynne substancje wybuchowe. Istniejący na terenie budowy zbiorników drzewostan sosnowy został najprawdopodobniej częściowo przerzedzony w stopniu koniecznym do

realizacji inwestycji. Po zakończeniu budowy betonowe ściany zbiorników były obsypywane nawiezioną ziemią i piachem. W czasie tych prac pnie drzew rosnących najbliżej zbiorników zostały również obsypane do wysokości około 3 m. Ocenę wieku drzewostanu sosnowego przeprowadzono w oparciu o analizę słoï rocznych odczytanych z wywiertów pobranych z drzew próbnych. Drzewa w wydzieleniu 27b były oznaczone w terenie numerami od 1 do 143. Nadleśnictwo Krzystkowice udostępniło schematyczny plan rozmieszczenia ponumerowanych drzew względem lokalizacji betonowych silosów.

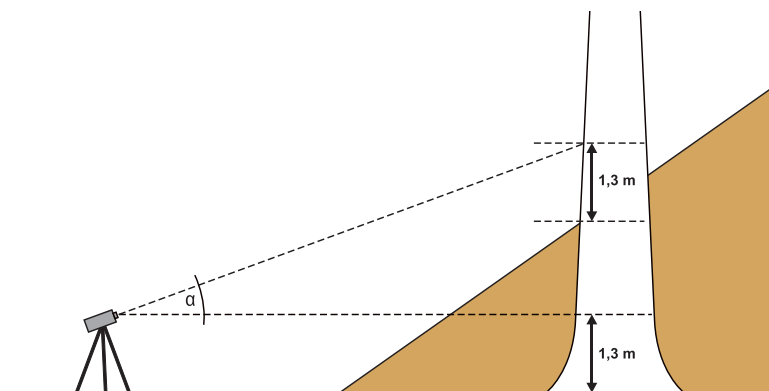
W ramach prac przygotowawczych wszystkie ponumerowane drzewa pomierzono na wysokości 1,3 m. nad powierzchnią gruntu. Uzyskane wyniki pozwoliły zaklasyfikować analizowane drzewa do 20 klas średnic. Z każdej klasy wybrano trzy drzewa próbne, jedynie z klas mniej licznych wybrano mniejszą liczbę drzew (ryc. 1).



Ryc. 1. Frekwencja drzew próbnych w klasach pierśnic – wydzielenie 27b

Fig. 1. Number of sample trees in DBH class – sub-compartment 27b

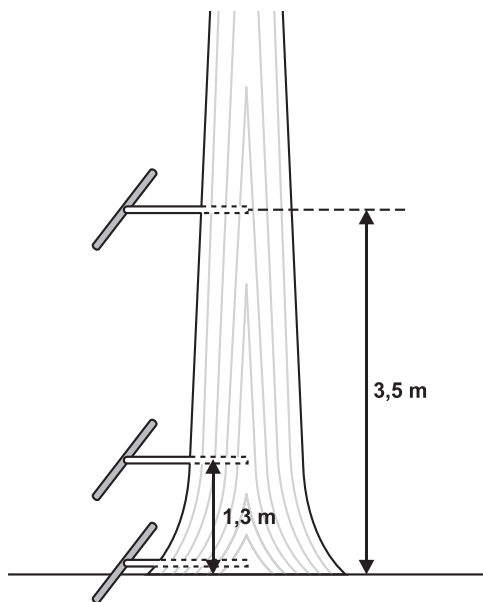
Łącznie wyznaczono 53 drzewa próbne, z których pobrano po jednym wywiercie dordzeniowym z wysokości 1,3 m nad poziomem gruntu. Dla każdego drzewa próbnego obliczono wysokość obsypania pnia w oparciu o pomiary odległości i kąta wykonane wysokościomierzem Vertex (ryc. 2).



Ryc. 2. Schemat pomiaru wysokości obsypania drzew próbnych

Fig. 2. Scheme of measuring of the height of buried sampling trees

Uzyskane próby poddano analizie w Instytucie Badawczym Leśnictwa w Sękocinie. Jednocześnie wyznaczono dwa drzewa modelowe reprezentujące drzewa nicobsypane. Z drzew tych pobrano po dwa dodatkowe wywierty z wysokości szyi korzeniowej (0 m.) i wysokości maksymalnego obsypania (3,5 m.; ryc. 3).



Ryc. 3. Schemat pobierania wywiertów z drzew modelowych - wysokości: 0; 1,3 i 3,5 m

Fig. 3. Scheme of sampling cores from modeling trees - height: 0; 1.3; 3.5 m

Próby te pozwoliły określić wiek rzeczywisty drzew modelowych oraz średni wiek, w którym pozostałe drzewa próbne osiągały wysokość obsypania. Prace kameralne obejmowały: przygotowanie mechaniczne i skanowanie wywiertów, analizę profili słoje rocznych za pomocą programu WinDENDRO Density V 2008 firmy Regent Instruments, wyznaczenie wieku drzew próbnych z uwzględnieniem wieku na wysokości obsypania.

Porównanie profili słoje rocznych uzyskanych w wyniku analizy wywiertów pobranych z drzew próbnych ujawniły wystąpienie silnej reakcji przyrostowej zapoczątkowanej w latach 1941-1955. Do identyfikacji wieku początku reakcji przyrostowej zastosowano model regresji segmentowej (Seber, Wild 2003):

$$\hat{y} = (a_0 + a_1 * X) * I + (b_0 + b_1 * X) * J$$

gdzie: $I=1$ dla $\hat{y} \leq b_0$ i $I=0$ dla $\hat{y} > b_0$, $J=0$ dla $\hat{y} \leq b_0$ i $J=1$ dla $\hat{y} > b_0$

\hat{y} - wartość estymowana zmiennej zależnej,

a_0, a_1, b_0, b_1 - parametry równania regresji,

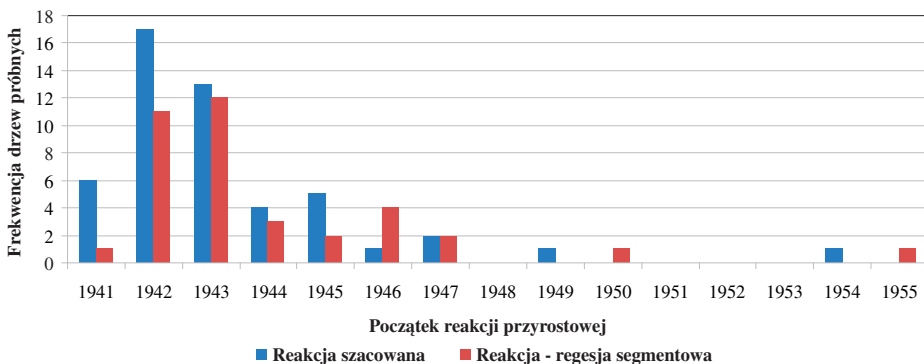
X - zmienna niezależna.

Model zbudowany jest z dwóch równań regresji liniowej: jedno dla tych wartości y , które są mniejsze lub równe punktowi przełamania (b_0), a drugie dla wartości większych. Przydatność modeli określano na podstawie wielkości współczynnika determinacji (R^2) oraz udziału wariancji

wyjaśnionej. Stopień dopasowania równań regresji liniowej zweryfikowano za pomocą testu t Studenta. Zastosowanie modelu regresji segmentowej wymaga spełnienia założeń dotyczących normalności rozkładu reszt. W celu sprawdzenia normalności rozkładu reszt (różnice wartości obserwowanej i oczekiwanej), co sprawdzono stosując test Kołmogorowa-Smirnowa z poprawką Lillieforsa. Dla drzew próbnych, dla których w modelach regresji segmentowej żadne z dwóch równań liniowych nie spełniło warunku dopasowania, skonstruowano modele regresji segmentowej zbudowane z trzech równań liniowych. W modelach tych punktami przełamania był domniemany początek reakcji przyrostowej oraz punkt kulminacji przyrostu rocznego.

Wyniki i dyskusja

Jedynie dla 10% drzew próbnych modele regresji segmentowej udało się dopasować dwustronnie. Natomiast jednostronnie dopasowane modele skonstruowano dla 65% drzew. Identyfikacja początku reakcji przyrostowej z zastosowaniem modeli regresji segmentowej pozwoliła zweryfikować wyniki uzyskane wizualną metodą oceny początku reakcji przyrostowej, opartą o analizę profili słoje rocznych. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą obu metod pozwoliło wykazać 37% przypadków błędnej identyfikacji początku reakcji przyrostowej (ryc. 4).



Ryc. 4. Porównanie wyników identyfikacji reakcji przyrostowej

Fig. 4. Comparing data obtained from two methods identification of growing reaction

Wszelkiego rodzaju zakłócenia przyrostu, zarówno biotyczne (np. gradacje owadów), jak i abiotyczne (huragany, niskie temperatury, powódzie, pożary itp.) zostają zapisane w cechach słoja rocznego (Bollschweiler et al. 2010). Reakcja przyrostowa uwidacznia się także jako efekt przeprowadzonych zabiegów hodowlanych, wynikających bądź to z potrzeb pielęgnacyjnych, bądź zastosowanej rębni poprzedzającej odnowienie drzewostanu. Zwiększenie dopływu światła i dostępnej przestrzeni życiowej skutkuje, w zależności od gatunku i wieku drzewostanu, zmiennym przyrostem z prześwietlenia. Geneza drzewostanu jest często nieznaną, a informacja o niej jest niezbędna przy uznawaniu drzewostanów zachowawczych. Zastosowanie przedstawionych modeli regresji segmentowej może przyczynić się do bardziej precyzyjnego wyznaczania momentu powstania odnowienia naturalnego oraz sposobu w jaki do tego odnowienia doszło. Na tej podstawie można wnioskować o ciągłości trwania lasu na danym obszarze, a tym samym zakwalifikować dany obiekt jako autochtoniczny i rodzimy. Z powyższym zagadnieniem wiąże się także pojęcie plastyczność populacji wobec zmieniających się warunków środowiska. W programach zachowania zasobów genowych oraz testowania potomstwa wybranych, najlepszych populacji i pojedynczych osobników drzew leśnych poszukuje się takich genotypów, które będą wykazywać duże zdolności adapta-

cyjne. Włączenie cech słoja rocznego do analiz porównawczych umożliwiłoby określenie ich zmienności proweniencyjnej, a tym samym wybór osobników potomnych charakteryzujących się właściwościami pożądanymi, z punktu widzenia selekcji.

Masowe występowanie szkodników owadzych, zwłaszcza szkodników pierwotnych sosny, jest niezwykle groźne ze względu na jednogatunkowy charakter lasów rosnących na ubogich siedliskach. Gradacje owadów składają się z kilku faz, z których najgroźniejszą jest faza kulminacyjna, trwająca do momentu jej załamania, spowodowanego oporem środowiska (choroby, pasożyty, drapieżniki) lub zabiegami ratowniczymi prowadzonymi przez człowieka. Silne żery foliofagów prowadzą do redukcji aparatu asymilacyjnego i w konsekwencji do zmniejszenia przyrostu. Na podstawie danych historycznych o występowaniu gradacji owadów i ocenie profili słojów rocznych możliwa jest retrospektywna analiza częstotliwości tego zjawiska oraz jego wpływu na żywotność drzew (Esper et al. 2007; Kochanowski, Bednarz 2007; Pohl, Hadley 2006). Odnalezienie sygnału przyrostowego wskazującego na występowanie początkowej fazy gradacji pozwoliłoby na skuteczne prognozowanie ponownego wystąpienia tego zjawiska (Folga 2011; Radwańska, Siwy 2011).

Przedstawiona metoda może znaleźć także zastosowanie przy określaniu momentu, a także urodzaju obradzenia nasion. Proces ten wiąże się z bardzo dużym wydatkiem energetycznym oraz przemieszczeniem asymilatów do organów generatywnych. Rzutuje to na zmniejszenie się przyrostu słoja rocznego nie tylko w roku wystąpienia urodzaju, ale także bezpośrednio przed nim (Chałupka et al. 1975, 1976). Uchwycenie początku reakcji może być bardzo użyteczną metodą prognostyczną, wspomagającą dotychczasowe metody oparte na obserwacji stopnia urodzaju oraz jakości zebranych nasion.

W publikacjach naukowych dotyczących reakcji przyrostowych drzew bardzo licznie reprezentowane są zagadnienia związane z zanieczyszczeniem środowiska (głównie powietrza) oraz zmianami klimatycznymi (Godek et al. 2008; Malik et al. 2011). Klasyczne metody określania momentu wystąpienia reakcji przyrostowej na zmieniające się warunki życia rośliny, wskazują na reakcję spowodowaną długotrwałym, skumulowanym oddziaływaniem czynnika stresowego. Mniejsze zakłócenia mogą nie być przez nie uchwycone, co utrudnia właściwą interpretację wyników. Zastosowanie narzędzi statystycznych w postaci modeli regresji segmentowej może być przydatne w weryfikacji poprawności wskazania początku reakcji przyrostowej rośliny.

Przedstawiona w niniejszej pracy metoda identyfikacji początku reakcji przyrostowej, oparta na analizie regresji segmentowej, jest próbą znalezienia właściwego narzędzia statystycznego.

Wnioski

- Zastosowanie modeli regresji segmentowej pozwala w większości przypadków precyzyjnie wyznaczyć początek reakcji przyrostowej drzew na czynniki warunkujące wzrost
- Model regresji segmentowej wykorzystujący dwie proste regresji nie zawsze wystarczająco dokładnie opisuje analizowane dane. W takim przypadku konieczne jest zastosowanie bardziej złożonego modelu opartego na kilku prostych.
- Wykorzystanie modeli regresji segmentowej może być alternatywnym narzędziem wspomagającym klasyczną metodę oceny reakcji przyrostowej, a w niektórych przypadkach skutecznie ją zastępować. Opisana metoda identyfikacji początku reakcji przyrostowej może znaleźć zastosowanie w datowaniu zjawisk kłęskowych na obszarach leśnych i w badaniach uwarunkowań ekologicznych reakcji fizjologicznych drzew

Literatura

- Bolschweiler M., Butler D. R., Luckman B. H., Stoffel M. 2010. *Tree ring and natural hazards*. Springer.
- Chałupka W., Giertych M., Królikowski Z. 1975. *The effect of cone crops on growth in Norway spruce*

- (*Picea abies* (L.) Karst.). Arboretum Kórnickie 20: 201-211.
- Chałupka W., Giertych M., Królikowski Z. 1976. *The effect of cone crops in Scots pine on tree diameter increment*. Arboretum Kórnickie 21: 361-366.
- Esper J., Büntgen U., Frank D. C., Nievergelt D., Liebhold A. 2007. *1200 years of regular outbreaks in alpine insects*. Proc. R. Soc. B. 274: 671-679.
- Folja J. 2011. *Porównanie przebiegu gradacji osnuj gniaździstej (Acantholyda posticalis Mats.) w drzewostanach Nadleśnictwa Chrzanów oraz Tułowice na podstawie analiz dendrochronologicznych*. maszynopis, Katedra Ochrony Lasu i Klimatologii Leśnej Wydziału leśnego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- Godek M., Migala K., Sobik M. 2008. *Air pollution and forest disaster in the Western Sudetes in the light of high elevation spruce tree-ring data*. W: Kaczka R., Malik I., Owczarek P., Gärtner H., Helle G., Heinrich I. (red.). *TRACE - Tree Rings in Archeology, Climatology and Ecology*, Vol. 7: Proceedings of the DENDROSYMPOSIUM 2008, April 27th - 30th 2008, Zakopane, Poland: 121-126.
- Hosius B., Leinemann L., Konnert M., Bergmann F. 2006. *Genetics aspects of forestry in the Central Europe*. Eur. Jour. Forest Res. 125: 407-417.
- Kochanowski D., Bednarz B. 2007. *Tree ring chronologies of Scots pine (Pinus sylvestris L.), Black pine (P. nigra Arnold), and Black alder (Alnus glutinosa (L.) Gaertn.) from the Słowiński National Park and neighbouring forests*. Acta Sci. Pol. Silv. Calendar. Rat. Ind. Lignar. 6(4): 29-47.
- Korczyk A. F. 1987. *Ochrona naturalnych zasobów genowych rodzimych gatunków drzew leśnych*. Sylwan 131 (9): 31-38.
- Ledig F. T. 1986. *Conservation strategies for forest gene resources*. Forest Ecology and Management 14: 77-90.
- Litkowiec M., Dering M., Lewandowski A. 2009. *Utility of two mitochondrial markers for identification of Picea abies refugial origin*. Dendrobiology 61: 65-71.
- Malik I., Wistuba M., Danek M., Danek T., Krąpiec M. 2011. *Wpływ emisji zanieczyszczeń atmosferycznych przez Zakłady Chemiczne w Tarnowskich Górach (północna część Wyżyny Śląskiej) na szerokość przyrostów rocznych sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.)*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych. 47: 9-21.
- Nowakowska J., Rakowski K. 2005. *Charakterystyka zmienności genetycznej sosny napiwodzko-rumuckiej i spalskiej na podstawie analiz mitochondrialnego DNA*. Leśne Prace Badawcze 2: 73-91.
- Pohl K. A., Hadley K. S. 2006. *Decoupling tree-ring signatures of climate variation, fire, and insect outbreaks in central Oregon*. Tree-ring Research 62 (2): 37-50.
- Radwańska J., Siwy A. 2011. *Zmiany szerokości przyrostów rocznych populacji świerka pospolitego (Picea abies L. (Karst.)) z Gorczańskiego Parku Narodowego opanowanej gradacją zasnuj wysokogórskiej (Cephalcia falleni Dalm., Hymenoptera, Symphyta)*. maszynopis, Katedra Ochrony Lasu i Klimatologii Leśnej Wydziału Leśnego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- Seber G. A. F., Wild C. J. 2003. *Nonlinear regression*. John Wiley and Sons, New York, New York, USA.

Szymon Jastrzębowski*, Marcin Klisz

*S.Jastrzebowski@ibles.waw.pl

Instytut Badawczy Leśnictwa